

1

BEWEGTE SYSTEME

IN DIESEM KAPITEL GEHT ES UM

Geschwindigkeit und
Beschleunigung

Bewegungsgleichungen

das Strömungsfeld

Feldlinien und Feldstärke

den Differenzialquotienten

die Rotation



Abb. 8.1 Der Philosoph Heraklit (ca. 520 v. Chr. – 460 v. Chr.) wirkte in Ephesos. Die Ruinen dieser bedeutenden Stadt der Antike liegen auf dem Gebiet der heutigen Türkei.



„Die Mathematik ist das Alphabet, mit dem Gott die Welt geschrieben hat.“

GALILEO GALILEI

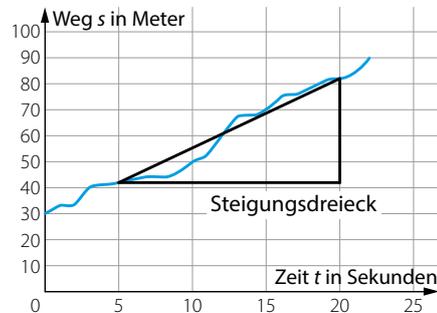


Abb. 8.2 Mittlere Geschwindigkeit

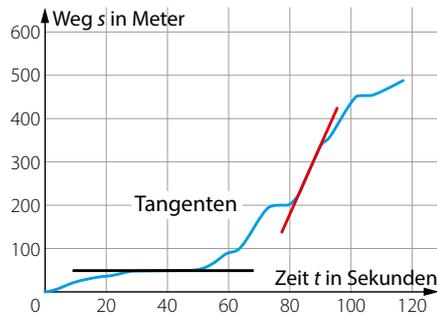


Abb. 8.3 Momentangeschwindigkeit

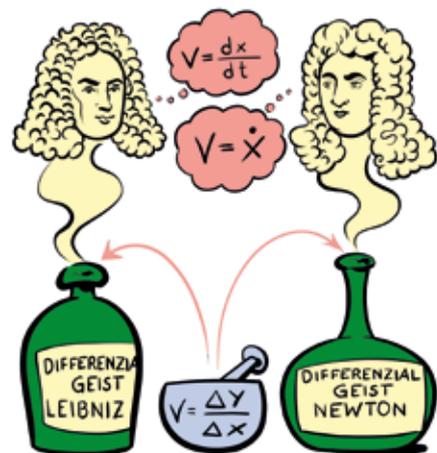


Abb. 8.4

„Alles fließt“

Dieses Zitat stammt aus der griechischen Philosophie. Der Philosoph Heraklit wollte damit zum Ausdruck bringen, dass die Welt ohne Veränderung undenkbar ist: Alles ist vergänglich und nichts hat auf ewig Bestand. Das Thema des Werdens und Wandels steckt in allen natürlichen Prozessen. Es steht auch im Zentrum dieses NAWI-Bandes.

Mathematik – die Sprache der Physik

Präzise Definitionen und exakte Formulierungen sind Wegbereiter der wissenschaftlichen Arbeitsweise. Diese Genauigkeit wird mithilfe der Sprache der Mathematik ermöglicht. Die Einführung der Differentialrechnung führte zum Höhenflug der klassischen Mechanik. Deswegen wird die Differentialrechnung gleich zu Beginn dieses Kapitels vorgestellt.

Hinweis: Vektorielle Größen werden mit Vektorsymbol (z. B. \vec{F} für Kraft) geschrieben; der Betrag einer Vektorgröße wird aber ohne Vektorsymbol angegeben.

1.1 Bewegungsgrößen (quantities of motion)

Die mittlere Geschwindigkeit

Angenommen, wir fahren auf dem Fahrrad und haben mit Gegenwind zu kämpfen. Wir fahren unterschiedlich schnell. Wie schnell sind wir im Mittel unterwegs?

Die **mittlere Geschwindigkeit** (average velocity) wird mittels **Differenzenquotient** (difference quotient) definiert:

$$v = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad [v] = \frac{m}{s}$$

v ... mittlere Geschwindigkeit $\frac{\Delta s}{\Delta t}$... Differenzenquotient
 Δs ... Wegdifferenz Δt ... Zeitdifferenz

Dieses Verhältnis wird in der Mathematik auch als **mittlere Änderungsrate** (average rate of change) bezeichnet. In **Abb. 8.2** ist ein Steigungsdreieck zur Berechnung der mittleren Geschwindigkeit im Intervall [5 s; 20 s] schwarz dargestellt. Die Rechnung findest du in **Beispiel 1.A** auf **Seite 9**.

Die Momentangeschwindigkeit als Differenzial

Bei Schienenfahrzeugen wird häufig der zurückgelegte Weg im Lauf der Zeit $s(t)$ gemessen. Das Weg-Zeit-Diagramm könnte so wie **Abb. 8.3** aussehen. Die jeweilige Momentangeschwindigkeit v des Fahrzeugs entspricht der Steigung der Tangenten im betreffenden Zeitpunkt t . In **Beispiel 1.A** (**Seite 9**) wird gezeigt, wie diese Geschwindigkeiten **grafisch** ermittelt werden können.

Berechnet wird die **Momentangeschwindigkeit** (instantaneous velocity) bei bekannter Funktion des Graphen mittels Differentialrechnung. Dabei geht man von der mittleren Änderungsrate $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ aus. Nun lässt man das Zeitintervall Δt immer kleiner werden. Im Grenzfalle werden beide Differenzen Δs und Δt „unendlich klein“. Man notiert dann für solch eine Größe „ ds “ bzw. „ dt “. Formal wird das mittels **Limes** angeschrieben:

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds(t)}{dt} = \dot{s}$$

$\frac{ds(t)}{dt}$... Differenzialquotient, sprich: „ ds von t nach dt “

Die Differentialrechnung wurde von Isaac Newton und Gottfried Wilhelm Leibniz nahezu gleichzeitig entwickelt. Daraus ergeben sich die zwei **unterschiedlichen Schreibweisen der Differentialrechnung**, auf die sich **Abb. 8.4** bezieht. Die Berechnung des Differenzialquotienten – das so genannte Differenzieren – ist ein wichtiges Thema im Gegenstand Angewandte Mathematik im III. Jahrgang.

BEISPIEL 1.A

Gegenwind

Franz kämpft beim Fahrradfahren mit Gegenwind.

- a) Ein typisches Weg-Zeit-Diagramm einer solchen Bewegung ist im Diagramm in **Abb. 8.2** abgebildet. Aus dem Diagramm soll die mittlere Geschwindigkeit im Zeitintervall $[5\text{ s}; 20\text{ s}]$ grafisch bestimmt werden.
- b) Aus dem Diagramm in **Abb. 9.1** soll die Momentangeschwindigkeit zum Zeitpunkt $t_1 = 9\text{ s}$ und $t_2 = 20\text{ s}$ jeweils grafisch ermittelt werden.

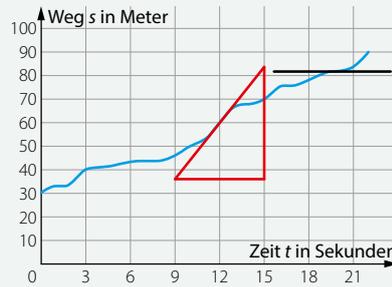


Abb. 9.1



Abb. 9.2 Fahrradfahrer im Gegenwind

- a) Mithilfe des schwarz gezeichneten Steigungsdreiecks in **Abb. 8.2** werden die Weg- und Zeitdifferenzen abgelesen und in den Differenzenquotienten eingetragen:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{81\text{ m} - 41\text{ m}}{20\text{ s} - 5\text{ s}} = 2,7 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 9,6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

- b) **Rote Tangente:** Mithilfe des rot gezeichneten Steigungsdreiecks in **Abb. 9.1** wird die Steigung der Tangente zur Zeit t_1 bestimmt:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{84\text{ m} - 37\text{ m}}{15\text{ s} - 9\text{ s}} = 7,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 28,2 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Schwarze Tangente: Im Zeitpunkt t_2 ist die Tangente waagrecht, die Geschwindigkeit des Fahrradfahrers ist hier 0 km/h , der Fahrradfahrer steht kurzzeitig still.

Die mittlere Beschleunigung

Beim Wegfahren von einer Kreuzung haben Radfahrer im Vergleich zu schweren, aber leistungsstarken Lkws tolle Beschleunigungswerte (**Abb. 9.3**). In **Band 1 von NAWI** wurde definiert: Unter der **Beschleunigung (acceleration)** versteht man eine **Geschwindigkeitsänderung pro Zeit**.

Für die Beschleunigung a gelten analoge Definitionen wie für die Geschwindigkeit. Häufig werden **mittlere Beschleunigungswerte (mean acceleration)** angegeben. Formal wird dies mittels Differenzenquotienten (mittlere Änderungsrate) im betrachteten Zeitintervall (*time interval*) angeschrieben:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad [a] = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

a ... mittlere Beschleunigung $\frac{\Delta v}{\Delta t}$... Differenzenquotient

Δv ... Geschwindigkeitsdifferenz Δt ... Zeitdifferenz

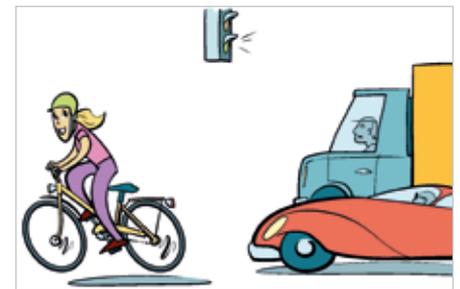


Abb. 9.3 Beim Wegfahren von einer Kreuzung haben Radfahrer aufgrund ihrer geringeren Masse tolle Beschleunigungswerte.

Die Momentanbeschleunigung als Differenzial

Berechnet wird die **Momentanbeschleunigung bei bekannter Geschwindigkeits-Zeit-Funktion** mittels Differenzialrechnung. Dabei geht man von der mittleren Änderungsrate $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ aus. Dies kann mittels **Limes** ausgedrückt werden:

$$a(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv(t)}{dt} = \dot{v}$$

$\frac{ds(t)}{dt}$... Differenzialquotient, sprich: „ dv von t nach dt “

In der Notation von Newton ist die Schriftform kürzer:

$a = \dot{v}$... erste Ableitung der Geschwindigkeitsfunktion nach der Zeit

$\ddot{s} = \frac{ds(t)}{dt}$... zweite Ableitung der Wegfunktion nach der Zeit

Grafisch wird die Momentanbeschleunigung als Steigung der Tangente im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm verstanden (**Abb. 9.4**).

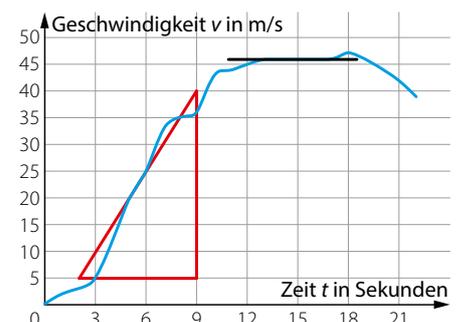


Abb. 9.4 Die momentane Beschleunigung entspricht im v - t -Diagramm dem Anstieg der Tangente.

BEISPIEL 1.B



Abb. 10.1 Rauchseeschwalbe im Sturzflug

Seeschwalbe

Rauchseeschwalben erjagen im Sturzflug und dem darauffolgenden Stoßtauchgang ihre Beute. Sie erreichen dabei enorme Geschwindigkeiten. Mittels Videoanalyse kann das Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm ermittelt werden. Solch ein Diagramm ist in **Abb. 9.4** ersichtlich.

- a) Es ist die momentane Beschleunigung zum Zeitpunkt $t_1 = 6$ s grafisch zu ermitteln.
- b) Der Bewegungszustand bei $t_2 = 15$ s und im darauffolgenden Abschnitt ist im Sachzusammenhang zu interpretieren.

a) Mithilfe des rot gezeichneten Steigungsdreiecks in **Abb. 9.4** werden die Geschwindigkeits- und Zeitdifferenzen abgelesen und in den Differenzenquotienten der Tangente eingetragen:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{35 \text{ m/s}}{7 \text{ s}} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

b) Bei t_2 ist die Tangente waagrecht, die Beschleunigung null und die Geschwindigkeit konstant. Danach verringert sich die Geschwindigkeit. Nachdem der Vogel die Maximalgeschwindigkeit erreicht hat, beginnt der Tauchgang.

ERGÄNZUNG & AUSBLICK



Abb. 10.2 Windkraftwerk: Bei modernen Windkraft-Anlagen wird die Winkelgeschwindigkeit des Rotors durch verstellbare Rotorblätter der Windgeschwindigkeit angepasst

Bewegungsgrößen der Rotation

Auch die Bewegungsgrößen der Drehbewegungen werden durch Differenzenquotienten und durch das Differenzial definiert:

Winkelgeschwindigkeit (mittlere): $\omega(t) = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$

Die **momentane Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$** ist die erste Ableitungsfunktion des Winkels φ nach der Zeit t :

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

Winkelbeschleunigung (mittlere): $\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$

Die **momentane Winkelbeschleunigung $\alpha(t)$** ist die erste Ableitungsfunktion der Winkelgeschwindigkeit nach der Zeit t :

$$\alpha(t) = \frac{d\omega(t)}{dt}$$

$\alpha(t)$... Beschleunigungsfunktion, $[\alpha(t)] = \text{s}^{-2}$

$\varphi(t)$... Winkelwegfunktion, $[\varphi(t)] = \text{rad} = 1$

$\omega(t)$... Winkelgeschwindigkeitsfunktion, $[\omega(t)] = \text{s}^{-1}$

MERK & WÜRDIG

- **Momentangeschwindigkeit** und **Momentanbeschleunigung** sind **Funktionen der Zeit**.
- Die **mittlere Geschwindigkeit** ist die mittlere Änderungsrate des Weges im beobachteten Zeitintervall.
- Die **mittlere Beschleunigung** ist die mittlere Änderungsrate der Geschwindigkeit im beobachteten Zeitintervall.

Momentangeschwindigkeit:

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds(t)}{dt} = \dot{s}$$

$v(t)$... Geschwindigkeitsfunktion $[v(t)] = \text{m/s}$

Momentanbeschleunigung:

$$a(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv(t)}{dt}$$

$a(t)$... Beschleunigungsfunktion $[a(t)] = \text{ms}^{-2}$

BEISPIEL 1.C

Differenzial: Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Das Weg-Zeit-Gesetz für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung (siehe **NAWI Band 1, Seite 67**) lautet: $s(t) = \frac{a}{2} \cdot t^2$ für $s(0) = 0$.

Die Funktionen der Momentangeschwindigkeit und der Momentanbeschleunigung sollen mittels Differenzialrechnung bestimmt werden.

$$v(t) = \frac{ds(t)}{dt} = \frac{d\left(\frac{a}{2} t^2\right)}{dt} = \frac{a}{2} \cdot 2 \cdot t = a \cdot t$$

Die Formel $v = a \cdot t$ ist als Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz der gleichmäßigen Beschleunigung bekannt.

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d(a \cdot t)}{dt} = a$$

Das Ergebnis bestätigt die Voraussetzung: Die Beschleunigung a ist konstant!

ÜBUNGEN

Bei der Bearbeitung der folgenden Übungen überprüfst du deine Kenntnisse und Fähigkeiten zum Thema Bewegungsgrößen.

Ü 1.1

Argumentiere. Notiere bei der Erklärung jeweils vollständige Sätze. Verwende die passenden Fachbegriffe.

Erkläre den prinzipiellen Unterschied zwischen mittlerer Geschwindigkeit und Momentangeschwindigkeit anhand eines Weg-Zeit-Diagramms.

Erik will unbedingt beim Fahrradfahren auf einem Display die jeweils aktuelle Momentangeschwindigkeit ablesen. Erkläre Erik, weshalb so ein Messgerät nicht existiert, und dass die Momentangeschwindigkeit nur annähernd bestimmt werden kann.

Ü 1.2

Abwägen. Beurteile die Aussagen und kreuze die richtigen Behauptungen an.

- Die Momentangeschwindigkeit ist im Allgemeinen eine Funktion der Zeit.
- Die mittlere Geschwindigkeit ist als Tangente im Weg-Zeit-Diagramm darstellbar.
- Erich will eine mittlere Geschwindigkeit berechnen. Er benötigt dafür ein Zeitintervall.
- Die erste Ableitungsfunktion nach dem Ort wird als Momentangeschwindigkeit bezeichnet.
- Durch zweimaliges Ableiten der Weg-Zeit-Funktion nach der Zeit erhält man die Momentanbeschleunigung.

Ü 1.3

Modellflugzeug. Videoanalyse-Programme können einfach als App auf dem Handy installiert werden. Solch ein Programm ermittelt aus einfachen Bewegungen das Weg-Zeit-Diagramm. In **Abb. 11.1** ist das Weg-Zeit-Diagramm eines landenden Modellflugzeuges abgebildet. Mit folgenden Aussagen wurde versucht, die Bewegung zu analysieren; allerdings treffen nicht alle Aussagen zu. Beurteile die Aussagen und kreuze die richtigen Behauptungen zu **Abb. 11.1** an.

- Nach etwa 2,5 s hat das Flugobjekt die höchste Geschwindigkeit, da die Tangente einen vergleichsweise steilen Anstieg aufweist.
- Ab Sekunde 17 ist die Geschwindigkeit konstant.
- Die Steigung der waagrechten Tangente ist nicht bestimmbar, daher kann nicht auf die Endgeschwindigkeit geschlossen werden.
- Das Flugobjekt legt im betrachteten Intervall einen Weg von etwa 80 m zurück.
- Die Steigung der roten Tangente lässt sich schätzen: etwa 20 m/s. Das Flugzeug bewegt sich mit etwa 70 km/h.

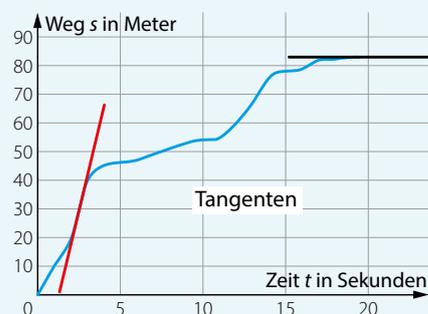


Abb. 11.1 Weg-Zeit-Diagramm eines Modellflugzeuges

Ü 1.4

Schnellbahn. Um die Verkehrssicherheit zu erhöhen oder die Energieeffizienz zu optimieren, werden in modernen Schienenfahrzeugen die Bewegungsprofile des Fahrzeugs aufgezeichnet. Es wird unter anderem der zurückgelegte Weg im Verlauf der Zeit gemessen und aufgezeichnet. Das Diagramm in **Abb. 11.2** zeigt solch einen Zusammenhang.

- Es soll die mittlere Geschwindigkeit im Intervall [60 s; 100 s] grafisch ermittelt werden. Zeichne dazu das geeignete Steigungsdreieck in **Abb. 11.2** ein, lies die Daten ab und berechne die mittlere Geschwindigkeit im betreffenden Intervall.
- Die Momentangeschwindigkeit soll grafisch mittels Tangentensteigung jeweils zum Zeitpunkt $t_1 = 40$ s und $t_2 = 70$ s ermittelt werden. Skizziere dazu die nötigen Tangenten, lies die Daten ab und bestimme die Momentangeschwindigkeiten.

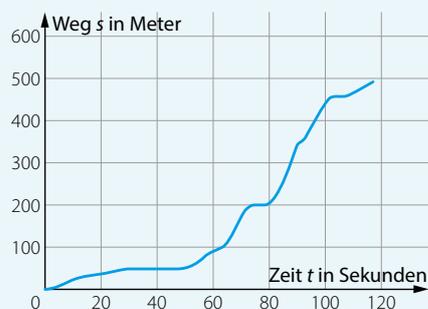


Abb. 11.2 Weg-Zeit-Diagramm eines Schienenfahrzeuges

Ü 1.5

Differenzialrechnung mit Bartgeier. Der Bartgeier ist mit einer Spannweite von 2,6 m der größte Vogel der Alpen. Die Population der Bartgeier wird im Nationalpark Hohe Tauern wissenschaftlich überwacht. Dazu werden unter anderem ausgewählte Tiere mit einem GPS-Sender, der an einem Beckengurt befestigt ist, ausgestattet, sodass die Flugdaten aufgezeichnet werden können. Angenommen, das Weg-Zeit-Gesetz für einen solchen Flug wird mit der Funktion $s(t) = -3t^2 + 71t + 36$ für das Zeitintervall [0 h; 8 h] angenähert, dann können daraus auch die Geschwindigkeitsdaten ermittelt werden. Die Koeffizienten sind so gewählt, dass sich der Weg in km ergibt, wenn die Zeit in Stunden eingegeben wird.

- Bestimme die Funktion der Momentangeschwindigkeit mittels Differenzialrechnung.
- Berechne die Momentangeschwindigkeit nach zwei Stunden.
- Interpretiere die Geschwindigkeits-Zeit-Funktion: Wie groß war die Anfangsgeschwindigkeit?



Abb. 11.3 Bartgeier



Abb. 12.1 Kraft und Beschleunigung stehen in einem engen Zusammenhang. Beim Rudern üben die Sportler eine Kraft auf die Ruder aus. Diese Kraft führt zu einer Beschleunigung des Boots. Bremsend wirkt indessen der Strömungswiderstand. Das Dynamische Grundgesetz beschreibt die Zusammenhänge: Mehr Kraft – mehr Beschleunigung! Für eine große Beschleunigung sollten Boot und Ruderer möglichst wenig Masse aufweisen.

1.2 Die Bewegungsgleichung (equation of motion)

Newton erklärte Bewegungsänderungen mit dem Begriff **Kraft**. Er hat Folgendes festgelegt: „Wirkt **keine Kraft**, dann bleibt die **Geschwindigkeit** eines Körpers **gleich**. Ändert sich die **Geschwindigkeit**, wird also eine Beschleunigung festgestellt, dann wirkt eine **Kraft**.“

Mit der Newton’schen Bewegungsgleichung wird diese Kraft definiert:

Dynamisches Grundgesetz (Newton’s 2nd Law / Law of acceleration)

$$F = m \cdot a$$

F ... Kraft, $[F] = \text{N}$ m ... Masse, $[m] = \text{kg}$ a ... Beschleunigung, $[a] = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Gleichungen solcher Art werden als Bewegungsgleichungen bezeichnet. In der Differenzialschreibweise ergibt sich somit:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv(t)}{dt} \quad \text{oder} \quad F = m \cdot \frac{d^2s}{dt^2}$$

Angenommen, es ist die Kraftfunktion bekannt, dann kann man die Wegfunktion $s(t)$ berechnen. Dazu sind die Methoden der Mathematik aus dem Bereich der Differentialgleichungen notwendig. Sie werden im Gegenstand Angewandte Mathematik in höheren Jahrgängen unterrichtet.

BEISPIEL 1.D



Abb. 12.2

Differenzial: Lotrechter Wurf

Die Bewegungsgleichung des lotrechten Wurfs ist zu bestimmen.

Die Gleichung ist mit der Lösungsfunktion zu überprüfen.

Die Gravitationskraft im Bereich der Erdoberfläche ist bekannt: $F = -m \cdot g$

Das Minus in der Formel deutet an, dass die Kraft nach unten wirkt. Somit ergibt sich die Bewegungsgleichung: $m \cdot a = -m \cdot g$

In Differenzialschreibweise: $m \cdot \frac{d^2s}{dt^2} = -m \cdot g$

Wir können nun die Identität durch zweimaliges Ableiten der Funktion überprüfen:

$$s(t) = -\frac{g}{2} t^2 + v_0 t + h_0 \quad \text{nach der Zeit ergibt:} \quad \frac{d^2s}{dt^2} = -g$$

Eingesetzt in die Bewegungsgleichung ergibt sich die Identität: $-m \cdot g = -m \cdot g$

Die Überprüfung ist gelungen.

ÜBUNGEN

Bei der Bearbeitung der folgenden Übungen überprüfst du deine Kenntnisse und Fähigkeiten zum Thema Bewegungsgleichungen und Differenzial.

Ü 1.6

Federpendel. Eine Spiralfeder mit linearem Federgesetz $F = -k \cdot x$ (x ... Auslenkung, k ... Federkonstante) wird ausgelenkt und dann einer freien (reibungsfreien) Schwingung überlassen. Stelle die Bewegungsgleichung auf.

Ü 1.7

Differenzieren – Ballspiel auf Io: Auf dem Jupitermond Io kann die Bewegungsgleichung für den lotrechten Wurf in der Nähe der Oberfläche ungefähr mit $m \cdot \frac{d^2s}{dt^2} = -2$ angegeben werden.

$s(t) = -t^2 + 5t + 2$ soll eine mögliche Lösungsfunktion der Bewegungsgleichung sein. Zeige mittels Differentialrechnung, dass die Funktion tatsächlich die Bewegungsgleichung erfüllt.

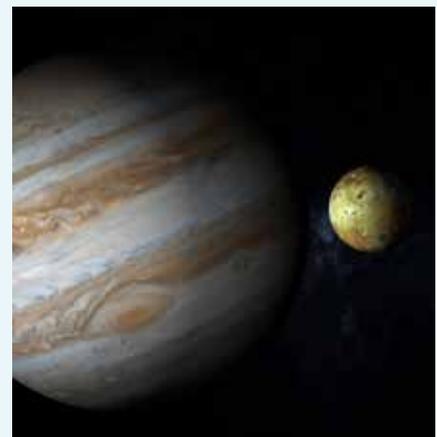


Abb. 12.3 Jupiter mit seinem Mond Io (rechts)

1.3 Physikalische Felder (physical fields)

In den **Abschnitten 1.1** und **1.2** wurden Bewegungsgrößen vereinfachend nur in einer Richtung angenommen. Auch der Ort des Geschehens wurde nicht genau angegeben. Es wurde zum Beispiel nur ausgedrückt, dass die Wurfbewegung auf der Erdoberfläche stattfindet.

Will man etwa beschreiben, wie die Strömung des Wassers in einem Fluss im Verlauf der Zeit an den verschiedenen Orten unterschiedlich schnell ist und verschiedene Richtungen einnimmt (**Abb. 13.1**), dann benützt man den Begriff **Feld**.

Der Feldbegriff

Unter einem Feld versteht man einen Bereich, in dem jedem Ort eine physikalische Größe zugeordnet wird. Dies sind Beispiele für verschiedene Arten physikalischer Felder:

- Gravitationsfeld (*gravitational field*)
- Strömungsfeld (Geschwindigkeitsfeld – *velocity field*)
- Temperaturfeld (*temperature field*)
- Elektrisches und Magnetisches Feld (*electric and magnetic field*)
- Lichtfeld (*light field*)
- Schallfeld (*sound field*)



Abb. 13.1 Steigst du in ein fließendes Gewässer, dann spürst du unterschiedliche Temperaturen, auch die Richtung und die Stärke der Strömung wirst du fühlen.

ERGÄNZUNG & AUSBLICK

Sonnenblumenfeld

Ein Sonnenblumenfeld kann im doppelten Sinn als Feld betrachtet werden: Als Feld einer Landwirtschaft und – bei physikalischer Betrachtung – als dynamisches **Richtungsfeld**. Der Neigungswinkel der Blüten gehorcht Gesetzmäßigkeiten:

Sonnenblumen reagieren auf Sonnenstrahlen und Temperatur. Sie steuern durch ihr Wachstum die Bewegung: Tagsüber wächst der Stamm der Sonnenblume auf der Ostseite mehr, sodass sich der Kopf nach Westen neigt. Nachts hingegen wächst die westliche Seite des Stammes stärker und die Blüte dreht sich wieder nach Osten.

Die typische Ost-West-Bewegung ist aber nur an jungen Sonnenblumen zu beobachten. In Feldtests haben Forschende herausgefunden, dass die Bewegung wichtig für das Wachstum ist. Ausgewachsene Pflanzen bewegen sich nicht mehr. Sie bleiben mit den schweren Samenköpfen Richtung Osten ausgerichtet.



Abb. 13.2 Sonnenblumenfeld

1.3.1 Eigenschaften von Feldern

Bei näherer Betrachtung der physikalischen Größen entdeckt man zwei Kategorien von Feldern:

- Eine Geschwindigkeit ist eine gerichtete Größe. Ein Strömungsfeld ist daher ein Beispiel für ein **Vektorfeld** (**Abb. 13.3**).
- Die Temperatur ist eine skalare Größe. Solche Felder nennt man **Skalarfelder** (**Abb. 15.2**).

Feldlinien (field lines)

Vektorfelder können mithilfe von **Feldlinien** (*field lines*) veranschaulicht werden. Das Stromlinienbild einer Strömung ist ein Beispiel dafür. Stromlinien (*streamlines of the field*) im Windkanal können z. B. durch Rauch sichtbar gemacht werden (**Abb. 14.1**). Im Feldlinienbild sind wichtige Informationen enthalten:

- Die **Richtung** der Strömungsgeschwindigkeit ist gleich der Richtung der Tangente an die Feldlinie an der jeweiligen Stelle.
- Die **Dichte** der Feldlinien ist ein Maß für die Stärke des Feldes. Beispielsweise erkennt man in **Abb. 13.3** oberhalb des rotierenden Körpers eine erhöhte Feldliniendichte. Die Strömung ist dort schneller.

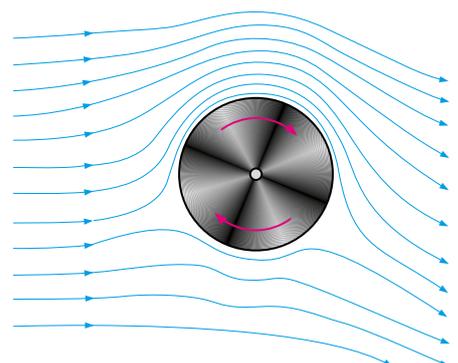


Abb. 13.3 Stromlinien um einen rotierenden Körper (Magnuseffekt)



Abb. 14.1 Mit optischen Methoden können im Windkanal Stromlinien sichtbar gemacht werden.

Für **Vektorfelder** gibt es noch eine weitere Charakterisierung:

- Gehen Feldlinien von bestimmten Punkten im Raum aus (Quellen) und enden in anderen Punkten (Senken), dann spricht man von **Quellenfeldern**. Ein Beispiel für ein Quellenfeld ist das elektrostatische Feld (Abb. 14.2).
- Treten Feldlinien als stets in sich geschlossene Schleifen auf, nennt man diese Art Wirbelfelder. Beispiele dafür sind Strömungsfelder oder Magnetfelder (Abb. 14.3).

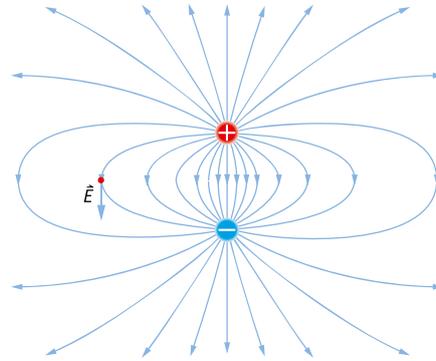


Abb. 14.2 Feldlinien des elektrischen Feldes: Sie gehen von der positiven Ladung aus (Quelle) und laufen zur negativen Ladung (Senke). Mehr dazu findest du auf Seite 47.

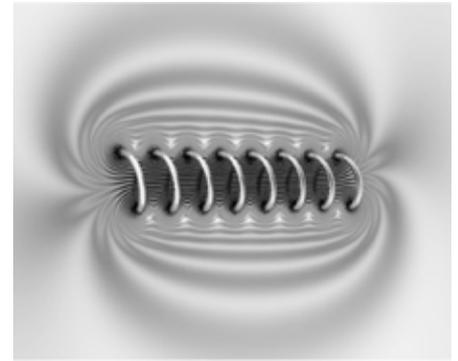


Abb. 14.3 Magnetfeld einer von Strom durchflossenen Spule: Im Inneren der Spule laufen die Feldlinien zurück und bilden geschlossene Schleifen.

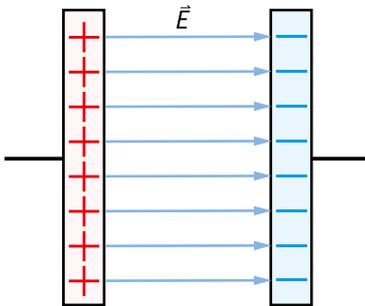


Abb. 14.4 Homogenes Feld eines Plattenkondensators.

Homogene Felder (*homogenous fields*)

Besonders einfach sind Felder, deren Feldliniendichte überall konstant ist. Die Feldlinien im Inneren einer stromdurchflossenen Spule sind parallel (Abb. 14.3). Die Feldliniendichte ist überall gleich. Auch zwischen den Platten eines Plattenkondensators (Abb. 14.4) liegt dieser Sonderfall vor. Solche Felder nennt man **homogene Felder**.

1.3.2 Feldgrößen

Feldstärke am Beispiel des Gravitationsfeldes

Die **Feldstärke E** (*field strength, magnitude of the field*) ist eine charakteristische physikalische Größe, die zur Feldbeschreibung dient. Am Beispiel des **Gravitationsfeldes** kann sie verständlich gemacht werden.

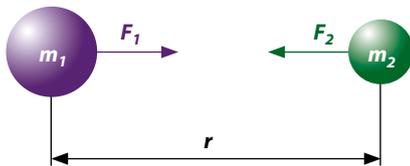


Abb. 14.5 Die beiden Massen ziehen einander mit der Gravitationskraft $F = F_1 = F_2$ an.

Zwischen zwei Massen m_1 und m_2 wirkt eine anziehende Kraft, die direkt proportional zu den Massen ist. Die Anziehungskraft wird mit dem Quadrat der Entfernung r kleiner (NAWI 1, Seite 129). Newton stellte das Kraftgesetz für diese gegenseitige Anziehung zwischen zwei Körpern auf: das nach ihm benannte Newton'sche Gravitationsgesetz (*Newton's law of universal gravitation*):

$$|\vec{F}| = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$|\vec{F}|$... Betrag der Gravitationskraft zwischen den beiden Massen

r ... Abstand zwischen den beiden Massen; m_1, m_2 ... Massen

G ... Gravitationskonstante, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

Für den Feldstärkebegriff wird nun eine praktische Voraussetzung getroffen: Es wird die Kraftwirkung auf einen sehr kleinen Probekörper mit der Masse m_p durch die Probemasse geteilt: $|\vec{E}| = \frac{|\vec{F}|}{m_p}$

Setzt man z. B. die Masse eines Himmelskörpers M und die Probemasse m_p in die Gravitationsformel ein, ergibt sich für den Betrag der **Feldstärke E** :

$$|\vec{E}| = \frac{|\vec{F}|}{m_p} = \frac{G \frac{M \cdot m_p}{r^2}}{m_p} = G \frac{M}{r^2}$$

Die Feldstärke ist unabhängig von der (kleinen) Masse m_p ; sie ist eine Feldgröße des zentralen Gravitationsfeldes des Zentralobjekts mit der Masse M und nimmt mit dem Abstand r^2 vom Zentralkörper ab. In Erdnähe entspricht die Feldstärke der Fallbeschleunigung g :

$$|\vec{E}| = G \frac{M}{r^2} = g$$

M ... Erdmasse; r ... Erdradius; G ... Gravitationskonstante, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

Den rechnerischen Nachweis dieser Überlegungen findest du in **Ü 1.10**.

Potenzial im Schwerefeld

Beim Bergsteigen kommt man am schnellsten ins Schwitzen, wenn man möglichst direkt der Falllinie entlang aufwärts geht. Man gewinnt dann **potenzielle Energie** $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$ (NAWI Band 1).

Geht man gemütlich entlang einer **Höhenlinie**, dann verrichtet man nahezu keine Arbeit (**Abb. 15.1**). Verschiebt man einen Körper im Gravitationsfeld und es wird dabei keine Arbeit geleistet, dann wird der Körper auf einer **Äquipotentiallinie** verschoben. Analog spricht man im Raum von **Potenzialflächen**.

Potenzial im elektrischen Feld

Im elektrischen Feld ist eine Äquipotentialfläche ein Gebiet, dessen Punkte alle das gleiche elektrische Potenzial aufweisen. Bewegt man einen Ladungsträger von einem Punkt der Äquipotentialfläche zu einem anderen Punkt derselben Äquipotentialfläche, dann verrichtet man dabei keine elektrische Arbeit (**Kapitel 2, Seite 147**).

Elektrische **Potenzialunterschiede** nennt man **elektrische Spannung**. Die Spannung U zwischen zwei Punkten derselben Äquipotentialfläche ist gleich null.

Bildliche Darstellung von Feldgrößen

Feldlinien und Äquipotentialflächen sind eine Möglichkeit, Felder grafisch zu veranschaulichen.

Bei der Darstellung von skalaren Feldern wie der topografischen Höhe ist es üblich, Höhenschichtlinien darzustellen und Flächen annähernd gleicher Höhe gleich einzufärben (**Abb. 15.1**). Auch Temperaturfelder werden so dargestellt, wie **Abb. 15.2** zeigt.

Dynamik von Feldern

Im Allgemeinen sind Felder zeitabhängig. Die Dynamik eines Teilchens wird, wie in diesem Kapitel beschrieben, mittels **Bewegungsgleichungen** beschrieben. Bei Feldern wird die Dynamik mit **Feldgleichungen** dargestellt. Der wesentliche Unterschied zwischen Feldgleichungen und Bewegungsgleichungen von Teilchen besteht darin, dass eine Feldgleichung an unendlich vielen Raumpunkten definiert ist.

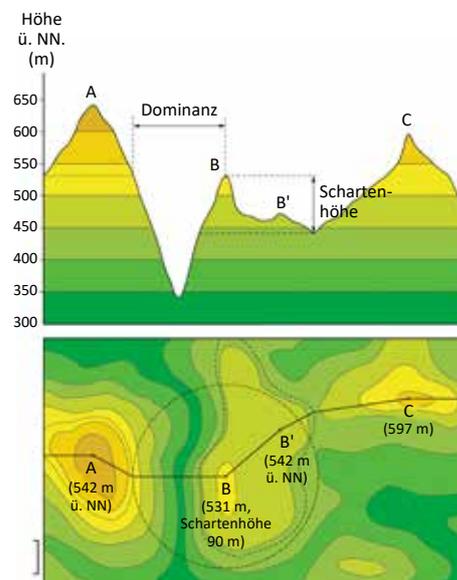


Abb. 15.1 Die Topografie wird durch Höhenlinien und farbliche Kennzeichnung veranschaulicht.

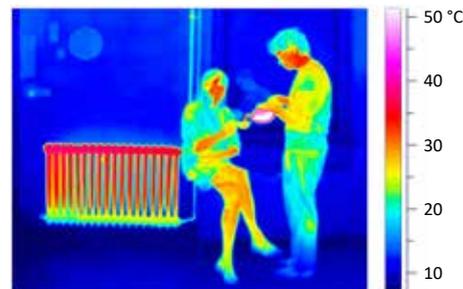


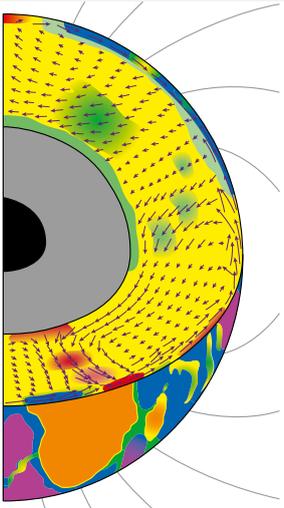
Abb. 15.2 Die Thermografie ist eine bildliche Darstellung der Oberflächentemperatur von Objekten.

MERK & WÜRDIG

- Felder werden in **Skalar-** oder **Vektorfelder** eingeteilt, je nachdem, ob skalare Größen oder Vektorgrößen zugeordnet werden.
- **Feldlinien** gehen bei Kraftfeldern in die Richtung der Kraft \vec{F} .
- **Definition der Feldstärke E** beim Gravitationsfeld:

$$|\vec{E}| = \frac{|\vec{F}|}{m_p}$$
 m_p ... kleine Probemasse; $[E] = \text{N/m}$
- Der Betrag der **Feldstärke** ist proportional zur **Feldliniendichte**.
- Man unterscheidet **Quellen-** und **Wirbelfelder**. Bei Quellenfeldern gehen die Feldlinien von Quellen aus und enden in Senken. Bei Wirbelfeldern sind die Feldlinien geschlossen.
- Feldlinien schneiden einander nicht.
- Verschiebt man eine Masse auf einer **Äquipotentialfläche**, dann wird keine Arbeit im Gravitationsfeld verrichtet.

BEISPIEL 1.E



Felder – Mantelkonvektion

Oft beschreibt man die Richtung einer Strömung durch Pfeile. **Abb. 16.1** zeigt die Konvektion von heißer Magma (= Gesteinsschmelze) im Erdmantel. Bearbeite die folgenden Fragestellungen.

- a) Welche Felder werden in der Grafik dargestellt? Gib auch die Eigenart der Felder an.
- b) Die Geschwindigkeit der Konvektionsströme liegt im Bereich von einigen Zentimetern pro Jahr. Es ist abzuschätzen, in welchen Zeiträumen sich Bewegungen abspielen. Der Erdmantel hat eine Dicke von etwa 600 km.

- a) Die Pfeile deuten ein Geschwindigkeitsfeld (Strömungsfeld) an. Strömungsfelder sind Vektorfelder bzw. Wirbelfelder. Die Farben stellen ein Temperaturfeld dar. Temperaturfelder sind Skalarfelder.

b) $v = \frac{s}{t} \Rightarrow t = \frac{s}{v} = \frac{600 \text{ km}}{0,01 \text{ m/a}} = 60 \text{ Millionen Jahre}$

Abb. 16.1 Mantelkonvektion: Warme Gebiete sind rot, kühle Gebiete blau dargestellt. Die Pfeile zeigen in Richtung der Strömung.

ÜBUNGEN

Bei der Bearbeitung der folgenden Übungen überprüfst du deine Kenntnisse und Fähigkeiten zum Thema physikalische Felder.

Ü 1.8

Argumentiere. Notiere bei der Erklärung vollständige Sätze und verwende dabei Fachbegriffe.

- a) Erkläre den prinzipiellen Unterschied zwischen Wirbel- und Quellenfeld.
- b) Erkläre den Begriff homogenes Feld und gib Beispiele dazu an.

Ü 1.9

Felder-Quiz. Beurteile die Aussagen und kreuze die richtigen Behauptungen an. Mehrfachantworten sind möglich.

- a) Ein Dichtefeld ist ... **A** ein Skalarfeld. **B** ein Vektorfeld.

Lies den Beitrag zu den Sonnenblumenfeldern (**ERGÄNZUNG & AUSBLICK, Seite 13**) und beantworte die Frage:

- b) Felder mit älteren Sonnenblumen sind typische Beispiele eines ...
 - A** dynamischen Richtungsfeldes.
 - B** statischen Richtungsfeldes.
- c) Die Dichte von Feldlinien ist ein Maß für die ...
 - A** Richtung der Feldgröße.
 - B** Größe der Feldstärke.
 - C** Geschwindigkeit bei Strömungsfeldern.
- d) Magnetische Felder sind ...
 - A** Quellenfelder.
 - B** Skalarfelder.
 - C** Wirbelfelder.
 - D** homogen.
- e) Maria behauptet im Zusammenhang mit dem Schwerefeld der Erde Folgendes: „Wenn ich mich genau entlang einer Äquipotenziallinie bewege, benötige ich fürs Gehen keine Energie.“ Hat sie recht?
 - A** Ja
 - B** Nein
 - C** Nur, wenn Maria sehr langsam geht.

Ü 1.10

Fallbeschleunigung. Überprüfe rechnerisch die Aussage von **Seite 15**: $|\vec{E}| = G \frac{M}{r^2} = g$

M ... Erdmasse, $M = 5,97 \cdot 10^{24}$ kg; r ... Erdradius, $r = 6\,371$ km

7

FOSSILE ROHSTOFFE

IN DIESEM KAPITEL GEHT ES UM

Erdöl

Erdgas

kohlenstoffbasierte Rohstoffe

alternative Energieformen





Abb. 98.1 Phytoplankton

Fossile Rohstoffe (*fossil raw materials*) entstanden im Laufe der Erdgeschichte durch biologische, chemische und physikalische Prozesse aus abgestorbenen Pflanzen. Diese Prozesse finden auch heute noch statt. Zu den fossilen Rohstoffen zählen insbesondere Energieträger wie

- Kohle (*coal*) und Torf (*peat*) (NAWI Band 2, Seite 78),
- Erdöl (*petroleum, crude oil, mineral oil*) und
- Erdgas (*natural gas*).

7.1 Erdöl (*mineral oil*)

Erdöl ist ein flüssiges Stoffgemisch. Es besteht hauptsächlich aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen, enthält zum Teil aber auch Schwefel, Stickstoff oder Sauerstoff als Fremdatome sowie anorganische Stoffe, darunter vor allem Salze. Erdöl ist ein wichtiger fossiler Energieträger und liefert eine Vielzahl der Ausgangsstoffe eines ganzen Industriezweiges, der **Petrochemie**.

7.1.1 Die Entstehung von Erdöl (*formation of mineral oil*)

Das Ausgangsmaterial für Erdöl waren Kleinstlebewesen im Meerwasser, vor allem **Algen** und **Phytoplankton** (Abb. 98.1). Unter Phytoplankton versteht man einzelne Pflanzen, die auch heute noch in den Oberflächengewässern der Ozeane leben. Sie produzieren einen Großteil des in der Atmosphäre vorhandenen Sauerstoffs. Nach dem Absterben sanken diese Lebewesen auf den Meeresboden. Für die Verwesung ist Sauerstoff notwendig, der üblicherweise durch Meeresströmungen herangeführt wird. Wurde das abgestorbene Plankton aber von Sedimenten (Sand und Schlamm) überschichtet, verhinderte der Sauerstoffmangel den Verwesungsprozess. Das organische Material blieb erhalten und bildete zusammen mit Resten der Gesteinsverwitterung **Faulschlamm** (*sludge*).

Immer weitere Sedimentablagerungen erhöhten den Druck der Gesteinsschichten und es entstand **Tonschiefer** (*slate*), das **Erdölmuttergestein**. Die meisten Muttergesteine enthalten ca. 1 % bis 2 % organisches Material. Der Gehalt kann teilweise sogar bis zu 20 % betragen. Muttergesteine entstanden vorzugsweise in nicht allzu tiefen Meeresgebieten, die vom offenen Ozean weitgehend abgetrennt waren. In Mitteleuropa herrschten entsprechende Bedingungen vor allem im Erdmittelalter, insbesondere im Unteren Jura, vor ca. 190 bis 210 Mio. Jahren (Abb. 98.2).

Das Fortschreiten der Überlagerungen und das Absinken des Muttergesteins in größere Tiefen sorgte für einen Anstieg des Drucks; zusätzlich fand zunehmend eine Erwärmung durch das Erdinnere statt: Diese Bedingungen waren die Voraussetzung für die chemische Umwandlung der pflanzlichen Substanz des Planktons in organische Stoffe. Man spricht von der **Reifung des Muttergesteins**. Im Wesentlichen fand zunächst eine Umwandlung der Kohlenhydrate, Proteine und Fette des Planktons in langkettige Kohlenstoffverbindungen, die **Kerogene** (*kerogens*), statt. Diese sind in organischen Lösungsmitteln unlöslich. Ab etwa 60 °C erfolgt die Zersetzung in kurzkettigere Kohlenwasserstoffe. Für die Bildung von Erdöl liegt die optimale Temperatur zwischen 65 °C und 120 °C, wie sie in einer Tiefe von 2 000 bis 4 000 Metern herrscht. Erdgas entstand hauptsächlich bei Temperaturen zwischen 120 °C und 180 °C in etwa 4 000 bis 6 000 Metern Tiefe.

Der Großteil der entstandenen flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffe wurde durch den zunehmenden Gesteinsdruck aus dem Muttergestein nach oben gepresst. Teilweise erreichten die Kohlenwasserstoffe die Erdoberfläche, meist wurden sie aber durch eine gekrümmte, undurchlässige Gesteinsschicht aufgefangen. Befand sich unter diesem **Deckgestein** ein speicherfähiges Gestein (z. B. Sandstein), so konnten sich Erdöl und Erdgas darin zu einer **Lagerstätte** ansammeln (Abb. 98.3). Üblicherweise spricht man aber nur dann von einer Lagerstätte, wenn eine Förderung wirtschaftlich erfolgen kann.

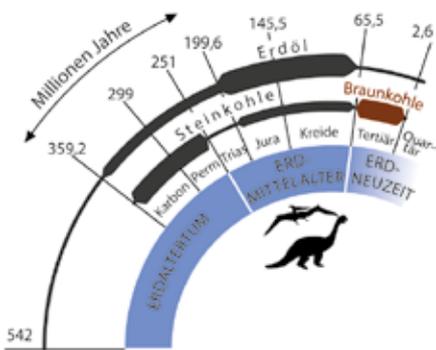


Abb. 98.2 Entstehung fossiler Rohstoffe

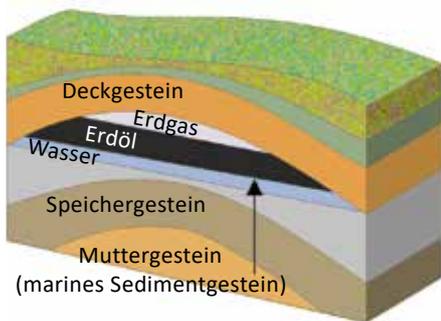


Abb. 98.3 Aufbau einer Lagerstätte



Abb. 98.4 Schwarzes Erdöl

7.1.2 Suche von Lagerstätten (*exploration of crude oil deposits*)

Die Gesteinsschichtungen unterhalb der Erdoberfläche lassen erste Rückschlüsse auf das Vorhandensein von Erdöl- oder Erdgaslagerstätten zu. Daher versucht man zuerst, solche charakteristischen Formationen zu finden. Eine gängige Methode ist die Seismik (*seismics*; **Abb. 99.1**).

Dazu werden im Erdboden **künstlich Schallwellen** ausgelöst. Dies geschieht z. B. durch einen Spezialsprengstoff, der in ca. 10 bis 15 Meter tiefen Bohrlöchern gezündet wird (**Sprengseismik**). Die Schallwellen breiten sich im Boden nach allen Seiten aus. An der Grenze unterschiedlicher geologischer Gesteinsformationen werden sie gebrochen und teilweise zur Erdoberfläche reflektiert. **Geophone** – hochempfindliche Messgeräte – wandeln die zurückkehrenden Schallwellen in elektrische Signale um. Diese werden gesammelt, digitalisiert zu einem Messwagen geleitet und von Geologinnen und Geologen ausgewertet (**Abb. 99.1**). In bebauten Gebieten werden die Schallwellen durch Spezialfahrzeuge (**Abb. 99.2**) erzeugt und auf den Untergrund übertragen (**Vibroiseismik**). Die Auswertung der reflektierten Schallwellen ergibt eine 3D-Darstellung des geologischen Aufbaus. Erweist sich eine Geländedeformation als mögliche Lagerstätte, werden Probebohrungen durchgeführt. Erst, wenn so die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Nutzung bestätigt wird, erfolgt die Förderung.

7.1.3 Förderung (*extraction*)

Moderne Tiefbohranlagen arbeiten heute vorwiegend nach dem **Rotary-Verfahren**. Dabei wird das Bohrgestänge mit dem Bohrmeißel (**Abb. 99.4**) gedreht. Dies geschieht meist über einen Drehtisch und die darin verankerte Mitnehmerstange. Je nach Härte der Gesteinsschichten wird der Bohrkopf unterschiedlich rasch verbraucht. Für eine Bohrung bis in die Tiefe von 5 000 Metern werden ungefähr 30 Bohrmeißel benötigt. Das Bohren ist sehr zeitaufwändig und teuer: Allein der Wechsel eines Bohrkopfes in 4 000 Metern Tiefe dauert etwa 14 Stunden. Eine Bohrung bis in eine Tiefe von 5 000 Metern kostet bis zu 12 Millionen Euro.

Um den Bohrmeißel zu kühlen, wird ständig **Spülflüssigkeit** in das Bohrgestänge gepresst. Im Bereich zwischen Bohrgestänge und Gestein steigt sie wieder nach oben und nimmt dabei das zerkleinerte Gestein mit. Dadurch wird außerdem die Bohrlochwand gestützt. Allerdings reicht dies bei größeren Bohrtiefen nicht aus, weshalb das Bohrloch mit Stahlrohren (**Futterrohren**) verkleidet wird.

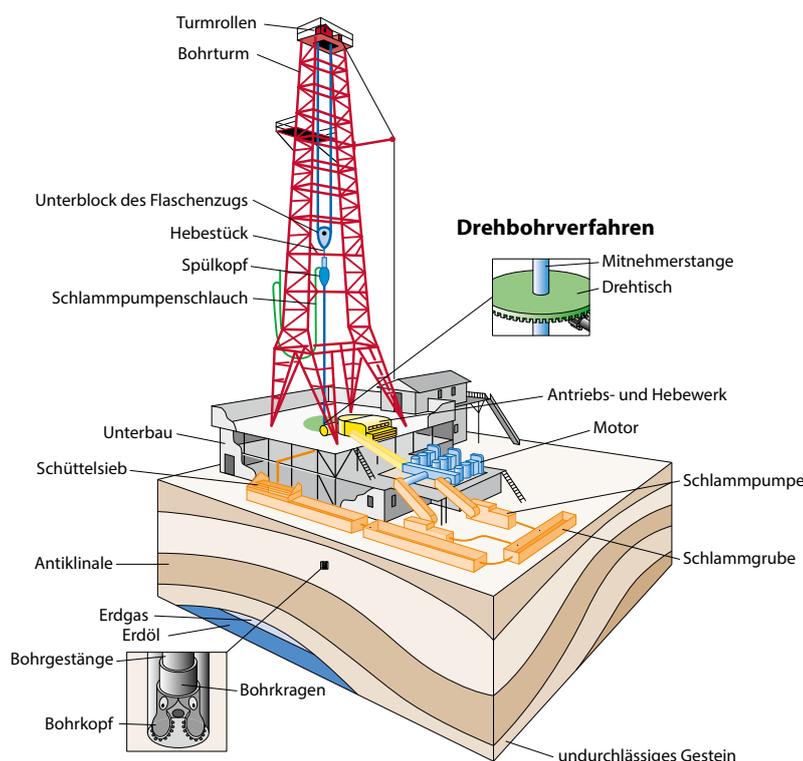


Abb. 99.6 Modell einer Bohrplattform

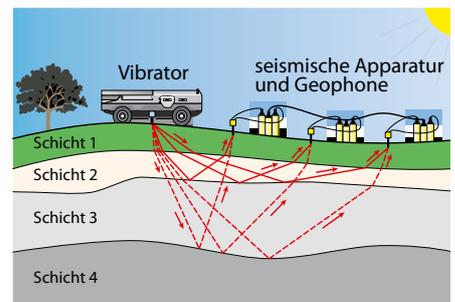


Abb. 99.1 Seismische Messung



Abb. 99.2 Vibroseis-Spezialfahrzeuge



Abb. 99.3 Rotary-Verfahren



Abb. 99.4 Bohrmeißel für Erdölbohrungen



Abb. 99.5 Bohrplattformen in Bergen, Norwegen



Abb. 100.1 Pumpförderung von Erdöl

Zur Förderung des Erdöls gibt es drei verschiedene Möglichkeiten: die **Primärförderung**, die **Sekundärförderung** und die **Tertiärförderung**.

Durch den natürlichen Druck in der Lagerstätte (ca. 250 bar in 2 500 Metern Tiefe) kommt das Erdöl zunächst von selbst an die Oberfläche. Als Folge der Ölentnahme sinkt jedoch der Druck; das Öl muss aus der Lagerstätte gepumpt werden. Diese Vorgehensweise ist die **Primärförderung** (Abb. 100.1).

Die **Sekundärförderung** wird am häufigsten eingesetzt. Zuerst wird Wasser in das Bohrloch gepumpt. Erdöl, das (meist) eine geringere Dichte besitzt als Wasser, wird dadurch aus dem Speichergestein verdrängt und an die Oberfläche befördert. Mit diesem Verfahren kann die Lagerstätte bis auf etwa 35 % ausgebeutet werden.

Mit der **Tertiärförderung** ist eine Steigerung auf ca. 50 % möglich. Das Einpressen von heißem Wasser oder Heißdampf setzt die Zähflüssigkeit (Viskosität) des verbleibenden Erdöls herab und ermöglicht die verbesserte Förderquote.

Die Technik des **Fracking** (Seite 109) dient zur Erschließung kleinerer Erdölvorkommen und zur Förderung von Gasvorkommen, die in Schiefergestein eingeschlossen sind.



Abb. 100.2 Verschiedene Rohölsorten

7.1.4 Eigenschaften von Rohöl (properties of crude oil)

Das geförderte Rohöl enthält noch Verunreinigungen wie Wasser und Sand. Rohöle bestehen aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen und verwandten Verbindungen (**heterocyclische Verbindungen**). Je nach Sorte sind sie helle, dünnflüssige bis dunkle, dickflüssige, teils zähe Massen (Abb. 100.2). Sie besitzen einen unterschiedlichen Gehalt an Alkanen, Cycloalkanen und Aromaten. Daneben sind noch kleinere Mengen an stickstoff-, sauerstoff- und schwefelhaltigen Verbindungen enthalten. Fast alle Rohöle liefern jedoch ein annähernd gleiches Ergebnis der quantitativen Elementaranalyse.



Abb. 100.3 Öltanker auf hoher See

Rohöl besteht aus ...	
83 bis 87 Gewichtsprozent Kohlenstoff	0 bis 6 Gewichtsprozent Schwefel
11 bis 15 Gewichtsprozent Wasserstoff	Spuren von Sauerstoff, Stickstoff und Metallen

Tabelle 100.1 Quantitative Elementaranalyse von Rohöl



Abb. 100.4 Rohölpipeline

7.1.5 Die Verarbeitung von Rohöl (crude oil refining process)

Mithilfe von **Tankschiffen** oder **Pipelines** erfolgt der Transport des Rohöls zu den **Raffinerien (refineries)**, in denen die Aufarbeitung mithilfe verschiedener Verfahren erfolgt. Durch gezielte Steuerung der Verarbeitungsverfahren kann die Ausbeute an Endprodukten genau dem Bedarf des Marktes angepasst werden. Einen Überblick über alle Prozesse bietet Abb. 112.5 auf Seite 112.

Ölreserven weltweit		
Land	Mrd. Barrel	%
Venezuela	304	18 %
Saudi-Arabien	290	17 %
Kanada	168	10 %
Iran	158	9 %
Irak	145	8 %
Russland	108	6 %
Kuwait	102	6 %
Vereinigte Arabische Emirate	98	6 %

Tabelle 100.2 Länder mit den größten Ölreserven in Mrd. Barrel (Datenquelle: BP, Stand 2020)

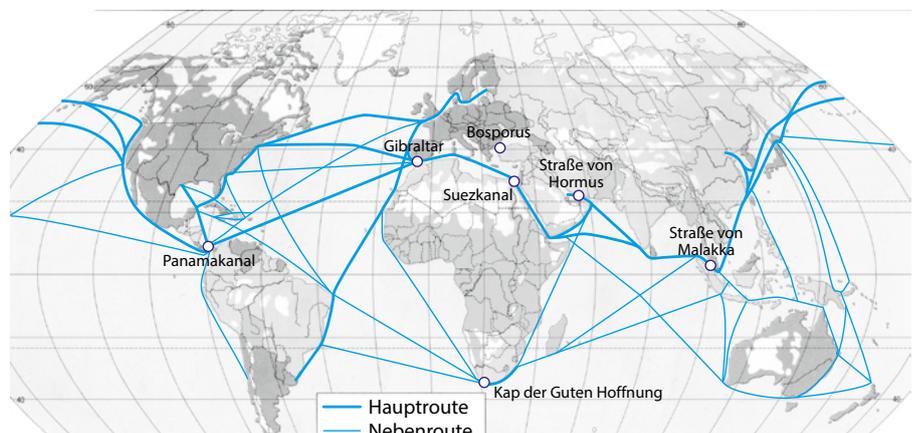


Abb. 100.5 Wichtige weltweite Tankerrouten: In Österreich erfolgt die Versorgung mit Erdöl vorwiegend über die Adria-Wien-Pipeline. Das Rohöl wird meist aus dem Nahen Osten über den Suez-Kanal per Schiff nach Triest transportiert und dort ins Pipeline-Netz gespeist

Primärdestillation (primary distillation)

Nach der Entsalzung (*desalting*) wird das Rohöl in Röhrenöfen auf etwa 350 °C bis 400 °C erhitzt und bei Normaldruck in einen hohen **Destillationsturm (Destillationskolonne – distillation column)** geleitet. Man spricht daher auch von **atmosphärischer Destillation (atmospheric distillation)**. Im Inneren sind die bis zu ca. 50 Meter langen Kolonnen mit durchlöcherchten Böden (z. B. Glockenböden) in Stockwerke unterteilt (**Abb. 101.1, Abb. 101.2**). Diese Einbauten kann man sich wie eine Hintereinanderschaltung vieler Destillationsschritte vorstellen.

Die als Dampf vorliegenden Komponenten des Rohöls steigen in der Kolonne auf, schwerflüchtige Anteile fließen auf den Grund des Turmes. Die **Glockenböden (bubble cap trays)** besitzen Überlaufstutzen, sodass sie ständig mit Flüssigkeit gefüllt sind. Die aufgesetzten Glockenkappen (*bubble caps*) sorgen dafür, dass der aufsteigende Dampf durch die auf den Böden stehende Flüssigkeit hindurchstreifen muss. Dadurch kommt es zum Stoffaustausch zwischen Flüssigkeit und Gas. Auf den Böden sammeln sich je nach Siedepunkt Gemische mit bestimmten Siedebereichen, die **Fraktionen**. Die Fraktionen werden ständig abgezogen. Aus diesem Grund nennt man diese Art der Destillation auch **fraktionierte Destillation (fractional distillation)** oder **Rektifikation (rectification)**. Da die Bestandteile auf den einzelnen Böden kondensieren, spricht man auch von **fraktionierter Kondensation (fractional condensation)**.

Der Siedepunkt der Bestandteile nimmt von unten nach oben ab. Am Kopf der Kolonne entweichen schließlich die Gase, die bei diesen Temperaturverhältnissen überhaupt nicht kondensieren. Je nach Bauart und Größe der Kolonne können unterschiedliche Fraktionen erzeugt werden. Die wichtigsten sind Gase, Benzin und leichte und schwere Mitteldestillate (Kerosin bzw. Diesel, Heizöl; **Abb. 101.4**).

Vakuumdestillation (vacuum distillation)

Bei einer Temperatur über 400 °C würden sich die Bestandteile des Rohöls zersetzen. Daher wird der **atmosphärische Rückstand** – jener Anteil, der bei der atmosphärischen Destillation nicht verdampft ist – unter vermindertem Druck (bei ca. 0 mbar bis 30 mbar) destilliert. Man erhält wieder einzelne Fraktionen und den **Vakuum-Rückstand**. Er besteht aus Schmierölen und Bitumen und ist nicht weiter destillierbar (**Abb. 101.4**).

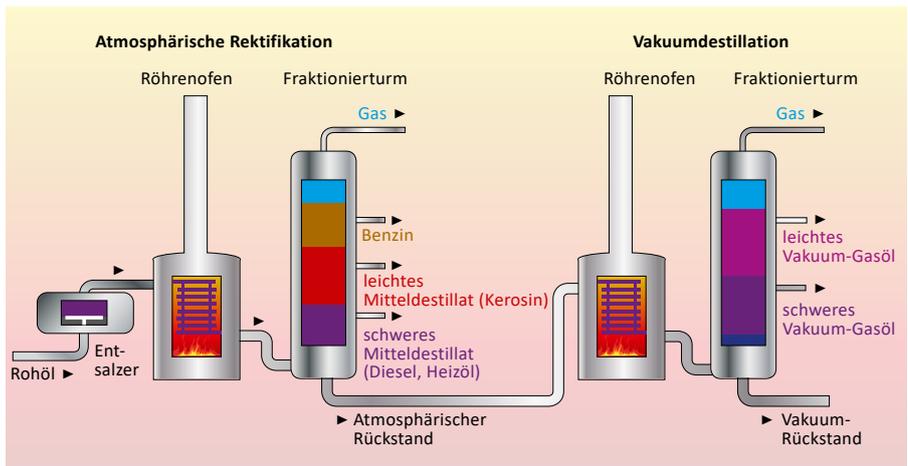


Abb. 101.4 Primär- und Vakuumdestillation

Die fraktionierte Destillation schafft nur eine grobe Trennung des Erdöls. Dünneflüssige Rohöle besitzen einen höheren Anteil von Benzinen, dickflüssige Rohöle einen hohen Anteil von schwerem Heizöl und Schmierölen. Der Gehalt an Benzin und Diesel in den Rohölen ist meist deutlich niedriger als für den Verbrauch benötigt (**Abb. 101.5**). Zur Deckung des Bedarfs müssen die Rohölfraktionen daher weiterbearbeitet werden.



Abb. 101.1 Destillationskolonnen einer Raffinerie

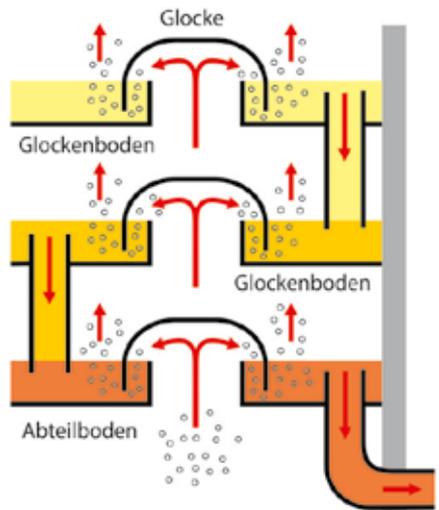


Abb. 101.2 Funktionsweise der Glockenböden



Abb. 101.3 Ausschnitt aus einem Glockenboden

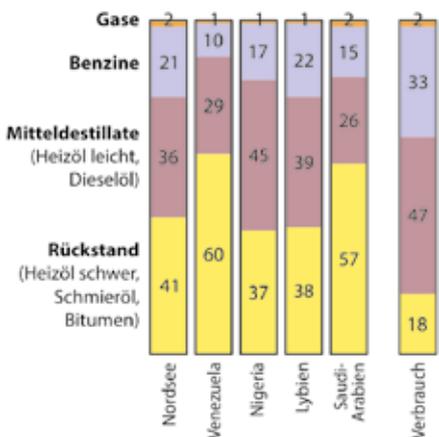


Abb. 101.5 Vergleich der Zusammensetzung von Rohölen unterschiedlicher Herkunft mit dem durchschnittlichen Verbrauch in Österreich.

S-Gehalt in ppm	Staat (Auswahl)
15 – 50	Georgien, Saudi-Arabien, Kenia, Nigeria, Tansania, Kolumbien
50 – 500	Äthiopien, DR Kongo, Niger, Republik Südafrika, Brasilien, Mexiko
500 – 2000	Pakistan, Algerien, Libyen, Tunesien, Argentinien, Bolivien, Venezuela
2000 – 5000	Kuwait, VAE, Eritrea, Kamerun, Liberia, Sambia, Peru
> 5000	Afghanistan, Irak, Jordanien, Ägypten, Mali, Somalia, Kuba

Tabelle 102.1 Schwefelgehalt im Diesel in parts per million (ppm) (Datenquelle: UNEP 2017)



Abb. 102.1 Crackanlage

Reinigung (refining)

Die einzelnen Fraktionen enthalten zu diesem Zeitpunkt immer noch organische Schwefelverbindungen. Durch Verbrennen dieser Treibstoffe würde Schwefeldioxid in der Atmosphäre freigesetzt werden; mit negativen Folgen wie dem Sauren Regen. Darüber hinaus schädigen diese Verbindungen bei der weiteren Verarbeitung der Fraktionen empfindliche Katalysatoren (z. B. Platin und Rhenium). Zur Lösung dieser Problematik wird die **Hydrodesulfurierung** eingesetzt: Vor der weiteren Verarbeitung findet eine katalytische Entschwefelung mit Wasserstoff in einer **Hydrofiner-Anlage** statt. Der Schwefelwasserstoff H₂S, der dabei entsteht, wird im Claus-Verfahren (**NAWI Band 2, Seite 82**) zur Gewinnung von reinem Schwefel verwendet.

Cracken (cracking)

Die Fraktionen, die durch die fraktionierte Destillation aus dem Rohöl gewonnen werden, beinhalten zu wenig kurzkettige Kohlenwasserstoffe. Der Bedarf an den Treibstoffen Benzin, Kerosin und Diesel (**Abb. 101.5**) sowie an Ethen, Propen und Buten für die chemische Industrie kann also ohne weitere Behandlungsschritte nicht gedeckt werden.

Durch das Crackverfahren werden lange Alkane in kürzere Alkane und Alkene gespalten. Diesen Vorgang nennt man **Konversion**. Man unterscheidet drei Verfahren: das **thermische Cracken**, das **katalytische Cracken** und das **Hydrocracken**.

- Beim **thermischen Cracken (thermal cracking)** werden Rückstände der Erdöldestillation unter Druck bei ca. 450 °C bis 800 °C gespalten. Eines der thermischen Crackverfahren ist das Steamcracken. Dabei erfolgt unter Zugabe von Wasserdampf die Spaltung in kurzkettige Alkene (z. B. Ethen, Propen).
- Beim **katalytischen Cracken (catalytic cracking)** sind durch die Verwendung von sauren Silikaten als Katalysator geringere Temperaturen und ein geringerer Druck als beim thermischen Cracken erforderlich. Es werden Vakuumgasöle zu kurzkettigen Alkenen und Alkanen gespalten.
- Das technisch aufwändigste Verfahren ist das **Hydrocracken**. Dabei wird Vakuumgasöl bei einem Druck von ca. 100 bar mit Wasserstoff vermischt, erhitzt und in einen Reaktor geleitet, in dem sich ein Katalysator befindet. In einem Abscheider wird anschließend der überschüssige Wasserstoff abgetrennt und in den Kreislauf zurückgeführt. Das Hydrocracken hat den Vorteil, dass sich je nach Katalysator und Betriebsbedingungen die gewünschte Ausbeute steuern lässt. Außerdem werden die meisten Schwefel- und Stickstoffverbindungen hydriert, so dass beträchtliche Mengen an H₂S und NH₃ anfallen.
- Eine weitere Form des Crackens ist das **Coken**, bei dem die schweren Rückstände aus der Vakuum-Destillation verarbeitet werden. Das Einsatzprodukt wird dabei auf ca. 500 °C erhitzt und in einer Koksammer gecrackt. Dabei entstehen niedrig siedende Kohlenwasserstoffe und ein spezieller Koks. Dieser Petrolkoks ist ein wichtiger Rohstoff zur Herstellung von Elektroden, wie sie bei der Schmelzfluss-elektrolyse von Aluminium benötigt werden (**NAWI Band 2, Seite 125**).

Die beim Cracken anfallenden Produkte werden anschließend wieder durch Destillation voneinander getrennt.

BEISPIEL 7.A

Cracken von n-Decan in leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe

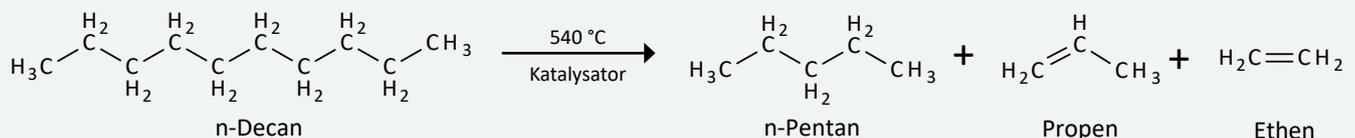




Abb. 104.1 An Zapfsäulen wird neben Diesel auch Benzin mit 95 und 98 Oktan verkauft.



Abb. 104.2 Die Kolben eines Motors bewegen sich, angetrieben von den Reaktionen der Brenngase, auf und ab.



Abb. 104.3 Motor eines Motorrads

ERGÄNZUNG & AUSBLICK

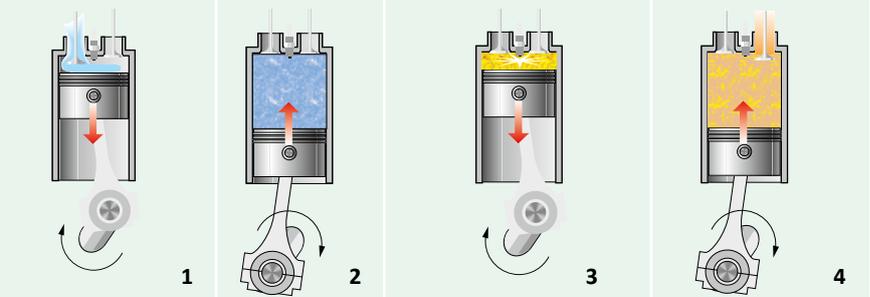
Der Viertaktmotor

In einem Viertaktmotor führt der Kolben vier Hubbewegungen aus: das Ansaugen, das Verdichten, den Arbeitstakt und das Ausstoßen. Diese Bewegungen bezeichnen wir als Takte.

Die 4 Takte eines Ottomotors

Ansaugtakt (1): Der Zylinder wird mit Luft und Brennstoff gefüllt.

Verdichtungstakt (2): Der Kolben drückt die Füllung zusammen und verdichtet sie. Kurz vor dem oberen Totpunkt wird das Gemisch gezündet.



Arbeitstakt (3): Die heißen Brenngase treiben den Kolben hinunter.

Auspufftakt (4): Die Brenngase werden ausgestoßen.

Die Zündung erfolgt nach dem Verdichten des Luft-Benzin-Gemisches kurz bevor der Kolben seine obere Position erreicht (Totpunkt). Zündung und Brennverhalten des Gemisches sind aufeinander abgestimmt, damit der Motor gleichmäßig läuft. Bei minderwertigem Benzin ist diese Reaktion unkontrolliert. Dies macht sich durch Druckspitzen als **Klopfen** bemerkbar, verschlechtert die Leistung und führt zur dauerhaften Schädigung des Motors.

Benzine

Die **Klopffestigkeit** von Benzinsorten wird unter standardisierten Bedingungen im Labor mit einem Normmotor getestet. Man vergleicht das Brennverhalten des Benzins mit jenem der Mischungen von iso-Octan (Oktanzahl 100; iso-Octan ist 2,2,4-Trimethylpentan) und n-Heptan (Oktanzahl 0). Superbenzin besitzt mind. 95 Oktan, d. h., er zeigt das Verbrennungsverhalten und ist ebenso klopfest wie eine Mischung aus 95 % iso-Octan und 5 % n-Heptan. Je höher die Oktanzahl ist, desto bessere Verbrennungseigenschaften besitzt das Benzin. Die **Research Oktanzahl (ROZ)** oder **Oktanzahl (octane number)** ist ein Maß für die Klopffestigkeit, d. h. die Verbrennungsqualität von Benzinen. Die Oktanzahl steigt in der Reihenfolge n-Alkane < iso-Alkane < Cycloalkane < Aromaten.

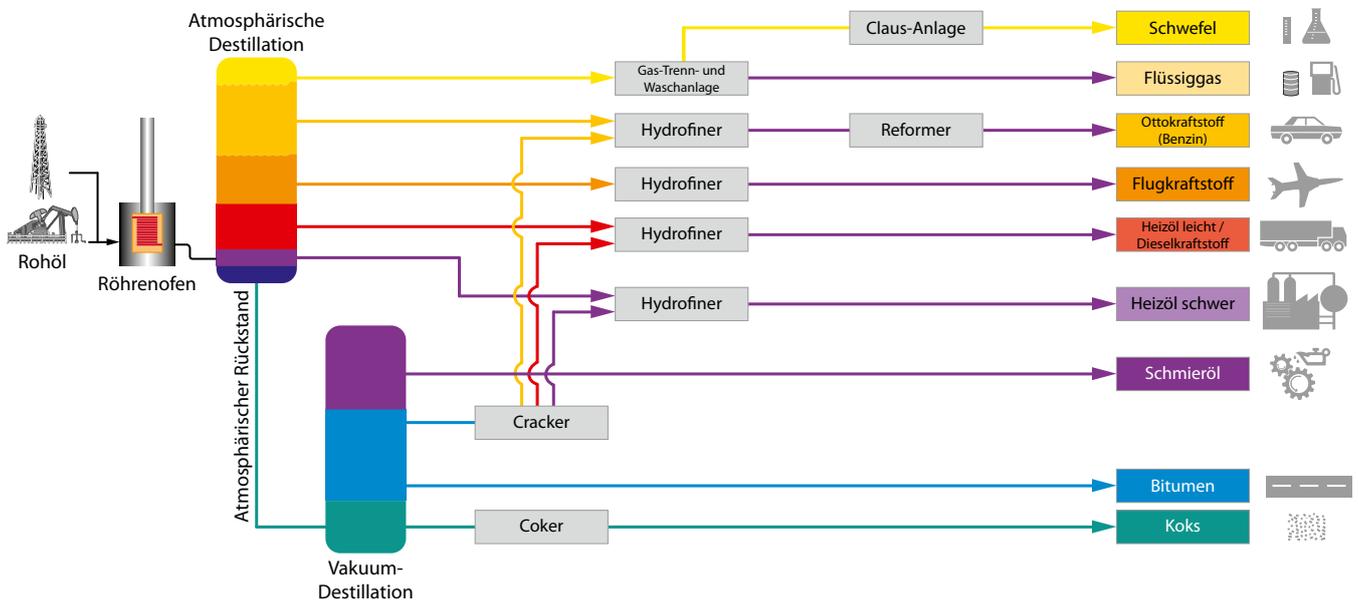


Abb. 104.4 Zusammenfassung: Überblick über alle Prozesse, die in einer Raffinerie ablaufen: Durch gezielte Steuerung der Verfahren kann die Ausbeute an Endprodukten genau dem Bedarf des Marktes angepasst werden.

7.1.6 Verwendung von Rohöl (*uses of crude oil*)

Erdöl ist (bzw. war) weltweit der wichtigste Energieträger. Etwa 90 % der jährlich geförderten Erdölmenge werden in Form von Heizölen und Kraftstoffen verbrannt, was wegen des CO₂-Ausstoßes enorm negative Auswirkungen auf das Erdklima mit sich bringt. Daher ist ein Ausstieg aus erdölbasierten Technologien unumgänglich. Nur etwa 10 % dienen der Herstellung von Grundstoffen für die chemische Industrie. Dennoch werden heute noch ca. 90 % aller Chemieprodukte auf der Basis von Erdöl hergestellt.

Eigenschaft	Beispiel	Verwendung
Ungesättigte Kohlenwasserstoffe	Ethen, Propen, Butadien	Ausgangsstoffe für Polymere (Kunststoffe)
Aromatische Verbindungen	Benzen, Toluol, Xylen	Grundstoffe der chemischen Industrie zur Herstellung vieler Verbindungen (u. a. Farbstoffe, Sprengmittel)
Hochmolekulare Kohlenwasserstoffe	Paraffinöle	Medizin und Kosmetik
Kohlenstoff	Koks, Ruß	Reduktionsmittel (Hochofen), Elektroden
Schwefel		Schwefelsäure, Vulkanisation von Kautschuk

Tabelle 105.1 Übersicht über die wichtigsten Produkte der petrochemischen Industrie

THEMA & GESELLSCHAFT

Die Transformation der Energiemärkte zu erneuerbaren Energiequellen

Krise als Chance

Die russische Invasion der Ukraine im Jahr 2022 löste eine globale Energiekrise aus. Dies führte zu einem nachhaltigen Schock auf den Energiemärkten: Auf dem Spotmarkt, auf dem Rohstoffe kurzfristig zu tagesaktuellen Preisen gehandelt werden, stiegen die Preise für Erdgas, Kohle und Erdöl in bisher unbekannte Höhen. Das Barrel Öl kostete Mitte 2022 zeitweise mehr als 100 US-Dollar. Die hohen Erdgas- und Kohlepreise wirkten sich auch auf die Stromkosten aus.

Als Ausgleich für entfallende russische Erdgaslieferungen steigerte Europa 2022 die Importe von Flüssigerdgas (LNG). Die Energiepreise wurden vorübergehend durch Subventionen und Preisdeckelungen abgefedert. Weitere kurzfristige Lösungen umfassen u. a. die Ausweitung der Öl- und Kohleverstromung, die Verlängerung der Laufzeiten einiger Kernkraftwerke und das Vorantreiben neuer Projekte für erneuerbare Energien.

World Energy Outlook 2022

Die jährlich erscheinende Veröffentlichung der IEA (*International Energy Agency*) geht davon aus, dass die Energiemärkte störanfällig bleiben: Noch in diesem Jahrzehnt werden starke Veränderungen in der weltweiten Energieversorgung erwartet. Bisher schien das Ziel der UN-Klimakonferenz von Paris 2015, die Erderwärmung auf maximal 2 °C zu begrenzen, in weiter Ferne. Der Krieg in der Ukraine sorgte für ein Umdenken und eine Beschleunigung der Transformation hin zu erneuerbaren Energieformen. Der internationale Energiehandel orientiert sich neu, weil sich Staaten auf eine permanente Störung der Versorgung Europas mit russischer Energie einstellen.

Die jährlichen Investitionen in saubere Energien sollen bis 2030 auf über 2 Billionen US-Dollar steigen. Auch die Politik hat nun erkannt: Investitionen im Bereich saubere Energie helfen nicht nur kurzfristig, die Rezessionsgefahr abzuwenden, sondern bergen Chancen für mehr Wachstum und Arbeitsplätze. Nachhaltige Technologien werden zu einem wichtigen Bereich des internationalen wirtschaftlichen Wettbewerbs.

Das Ende der erdölbasierten Wirtschaft?

Die Zuwächse der erneuerbaren Energien und der Kernkraft werden langfristig sein. Die Erdgas- und Ölnachfrage in der Europäischen Union wird angesichts des schnelleren Ausbaus der „Erneuerbaren“ und großer Effizienzsteigerungen noch in den 2020er Jahren um 20 %, der Kohlebedarf sogar um 50 % zurückgehen.

Das *Net Zero Emissions by 2050* (NZE)-Szenario hält die Begrenzung des mittleren globalen Temperaturanstiegs auf 1,5 °C für (gerade noch) möglich. Erstmals zeigt das *World Energy Outlook*-Szenario, dass die weltweite Nachfrage nach den verschiedenen fossilen Energieträgern auf einen Höhepunkt zusteuert oder sein Plateau erreicht hat.



Abb. 105.1 Produkte aus verschiedenen Kunststoffen (Polymeren)



Abb. 105.2 Acrylbasierte Lacke enthalten aromatische Verbindungen.



Abb. 105.3 Hautpflegeprodukte wie Vaseline basieren auf Paraffinölen.



Abb. 105.4 Graphit-Elektroden



Abb. 105.5 Autoreifen werden vulkanisiert.

MERK & WÜRDIG

- **Entstehung von Erdöl:** anaerobe Verwesung von Algen und Plankton und deren Umwandlung zu langkettigen Kohlenstoffverbindungen
- **Vibroseismik:** Methode zur Erkundung von Erdöllagerstätten
- **Rotary-Verfahren:** Methode der Bohrung nach Erdöllagerstätten

Fördermethoden

- **Primärförderung:** Förderung des Erdöls durch Pumpen
- **Sekundärförderung:** Einpressen von Wasser
- **Tertiärförderung:** Anwendung von Dampf

Destillation

- **Primärdestillation** (atmosphärische Destillation): Erhitzung des Rohöls auf ca. 350 °C bis 400 °C, Trennung nach dem Siedepunkt bei Normaldruck in einer Destillationskolonne
- **Vakuumdestillation:** Trennung von höher siedenden Komponenten bei ca. 0 mbar bis 30 mbar
- **Rektifikation (fraktionierte Destillation):** Einbauten wie Glockenböden ermöglichen die Trennung eng beieinander siedender Komponenten des Erdölgemisches in Fraktionen.

Reinigung

- **Hydrodesulfurierung:** Reduktion des Schwefelgehalts durch katalytische Reaktion mit Wasserstoff in einer Hydrofiner-Anlage

Cracken

- **Spaltung** langkettiger Kohlenwasserstoffe in **kurzkettige Alkane und Alkene**
- **Katalytisches Reformieren** wandelt unverzweigte KWS in verzweigte (**Isomerisierung**) oder ringförmige (**Cyclisierung**) Verbindungen um.
- **Dehydrierung** wandelt die Verbindungen in **Aromaten** um.

ÜBUNGEN

Bei der Bearbeitung der folgenden Übungen testest du deine Kenntnisse und Fähigkeiten zum Thema Erdöl als fossiler Rohstoff und seiner Rolle für Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft.

Ü 7.1

Entstehung. Analysiere **Abb. 98.2** auf **Seite 98** und beantworte folgende Fragen:

- a) Aus welchem Erdzeitalter stammen die wichtigsten Vorkommen von Steinkohle bzw. Braunkohle?
- b) Vor wie vielen Millionen Jahren sind die wichtigsten Erdölvorkommen entstanden?

Ü 7.2

Eigenschaften. Erdöl besitzt je nach Fundort unterschiedliche Eigenschaften, etwa bezüglich der Dichte oder des Schwefelgehalts. Nach dem *American Petroleum Institute* wird die Dichte von Erdöl weltweit in API-Grad angegeben. Der API-Grad ergibt sich aus der Dichte des Rohöls in Bezug auf Wasser.

- Rohöl mit einem API-Grad größer als 10° schwimmt auf Wasser.
- Rohöl-Sorten über 31,1° API werden als „leicht“, solche unter 22,3° API als „schwer“ bezeichnet.
- Leichte Rohöle besitzen einen höheren Anteil an kurzkettigen Kohlenwasserstoffen und eignen sich besser für die Gewinnung von Benzin, Diesel und Kerosin.
- Rohölsorten mit wenig Schwefel werden als „süß“, solche mit einem hohen Schwefelanteil als „sauer“ bezeichnet.

In **Abb. 106.1** zeigt die x-Achse den Schwefelgehalt einiger Erdölsorten (in %), die y-Achse bezeichnet den API-Grad. Beantworte anhand der Grafik und der bekannten Informationen die Fragestellungen.

- a) Erörtere, ob *Arab Light* auf Wasser schwimmt.
- b) Welchen durchschnittlichen Schwefelgehalt besitzt die Sorte *Maya*, die in Mexiko gefördert wird? Gib an, ob es ein „süßes“ oder „saureres“ Rohöl ist.
- c) Stelle eine Hypothese darüber auf, was die Bedeutung der Zahl 17 in der Abkürzung *BCF-17* (Rohöl aus Venezuela) bedeuten könnte.
- d) Bewerte: Welches Rohöl wird sich besser für die Gewinnung von Benzin eignen: *BCF-17* oder *Brent Blend* (aus der Nordsee)?

Ü 7.3

Terminology. Answer the following questions. You can also look up further information online.

- a) A group of compounds collected during distillation is called a _____.
- b) Oil is traded in barrels. How many litres make up one barrel?

Ü 7.4

Transport. Recherchiere in verschiedenen Medien nach Pipelines in Österreich und beantworte folgende Fragen.

- a) Wofür stehen die Abkürzungen der folgenden Pipelines: TAL, AWP, TAG.
- b) Gib ihre Ausgangs- und Endpunkte an.

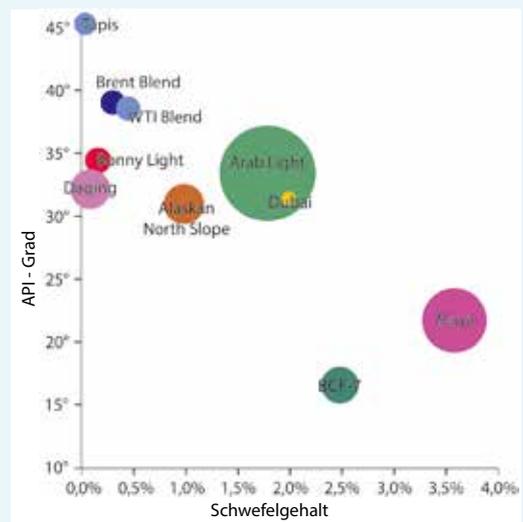


Abb. 106.1 API-Grad gegen Schwefelgehalt